第46卷 第7期
2023年7月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 7
Jul. 2023

不同林分密度青海云杉林碳氮储量及其分配格局

冯宜明[1]， 吕春燕[1]， 王 零[2]， 赵维俊[3]， 马雪娥[3]， 杜军林[1]， 何俊龄[1]

（1. 河西学院，甘肃 张掖 734000；2. 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心，甘肃 张掖 734000；
3. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000）

摘 要：为深入了解青海云杉林生态系统碳、氮固持能力与循环及其影响机制，以不同林分密度（350株·hm^{-2}、850株·hm^{-2}、1000株·hm^{-2}、1400株·hm^{-2}、1600株·hm^{-2}、1950株·hm^{-2}、2100株·hm^{-2}、2300株·hm^{-2}、3000株·hm^{-2}）青海云杉林为研究对象，通过野外调查、样品采集和室内分析，研究不同林分密度青海云杉林生态系统碳、氮储量及其分配格局。结果表明：（1）青海云杉林乔木碳、氮含量均值分别为497.11 g·kg^{-1}和4.43 g·kg^{-1}，各器官碳含量分配格局表现为干>根>叶>枝>皮，氮含量为叶>枝>根>皮>干；林下植被层碳、氮含量总体呈现灌木层>草本层>枯落物层，地上部分>地下部分；土壤层碳、氮含量随着林分密度的增加均呈下降趋势，并且随土层加深也逐渐减小。（2）青海云杉林生态系统碳储量随林分密度的增加呈双峰型分布，氮储量呈现先增加后波动降低的趋势，林分密度为850株·hm^{-2}时林分碳、氮储量最高，分别为500.76 t·hm^{-2}和25.00 t·hm^{-2}，林分密度为3000株·hm^{-2}时林分碳、氮储量均最低，分别为315.52 t·hm^{-2}和12.52 t·hm^{-2}；随林分密度增加，植被碳、氮储量占比逐渐升高，土壤碳、氮储量占比逐渐降低。碳储量分配格局为：土壤层（73.53%）>乔木层（17.03%）>灌草层和枯落物层（9.44%），氮储量分配格局为：土壤层（87.63%）>灌草层和枯落物层（9.90%）>乔木层（2.47%）。（3）林分密度与森林碳、氮储量及分配格局密切相关，低密度（850株·hm^{-2}）利于植被和土壤碳、氮固持能力显著提高，是祁连山青海云杉中龄林的最佳留存密度。研究结果为揭示林分密度对森林生态系统碳氮固持能力的影响机制和森林结构化经营提供科学依据。

关 键 词：林分密度；青海云杉林；碳、氮储量；祁连山
文章编号：1000-6060(2023)07-1133-12(1133~1144)

森林作为陆地生态系统的主体，维持着全球陆地生态系统86%的植被碳库和73%的土壤碳库[1-2]，在全球碳平衡、减缓大气CO_2浓度上升、调节全球气候稳定等方面具有显著作用[3-4]。生态系统中碳氮存在耦合效应，氮能够促进林木的生长，调节森林碳汇[5]。因而，量化研究森林生态系统的碳、氮储量及分配格局有助于明确森林固碳与氮素吸存关系，是理解全球碳氮循环以及应对气候变化的关键。

林分密度控制是森林经营的一个重要方面[6]。林分密度不但影响森林环境，还影响树木的生长发育以及各器官生物量和碳、氮储量的分配[7]。代林利等[8]、Noh等[9]和Mayer等[10]分别就杉木林、赤松林、侧柏林碳储量研究认为，碳储量对林分密度的响应较为复杂且没有一致的规律，还需继续深入研究。而对于林分密度与森林生态系统氮储量的关系研究尚未见相关报道。

青海云杉（*Picea crassifolia*）是祁连山区的主要森林类型，分布面积占祁连山区森林总面积的

收稿日期：2022-09-22； **修订日期：**2022-11-06
基金项目：甘肃省自然科学基金项目（21JR7RA554，22JR5RA771）；甘肃省陇原青年创新创业人才项目（2022LQGR28）；国家自然科学基金项目（32060247）；2022年度中央引导地方科技发展资金项目（22ZY2QG001）；河西学院2020博士科研启动金项目（KY-QD2020003）资助
作者简介：冯宜明（1985-），男，博士，正高级工程师，主要从事森林生态与可持续经营研究. E-mail: fym850321@126.com
通讯作者：王零（1978-），男，硕士，正高级工程师，主要从事森林资源调查及经营管理研究. E-mail: 33936046@qq.com

75.72%,对于维系祁连山的物种多样性、改善区域小气候、涵养水源和生态平衡均有着至关重要的作用[11-12]。国内外学者已经对青海云杉开展了大量的研究,主要集中在林分结构[13]、径向生长[14]、土壤理化性质[15]、种群空间分布格局[16]以及基于海拔梯度的青海云杉生物量和碳储量估算[17]等方面。然而针对不同林分密度青海云杉林生态系统碳、氮储量及其分配格局尚未见报道。本文选择9个林分密度的青海云杉林,研究其生态系统各组分碳、氮储量的变化特征和分配状况,旨在阐明不同林分密度对青海云杉林植被和土壤碳、氮固持能力的影响,为大尺度森林碳、氮储量准确估算提供科学数据,同时为青海云杉林的经营管理和碳汇管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段北坡的大野口流域(38°16′~38°33′N,100°13′~100°16′E),流域面积约68.06 km²。该流域地形复杂多样,属于北祁连山褶皱带,海拔2650~4600 m;属温带大陆性高寒山地气候,雨热同期,年降水量435.5 mm,年蒸发量1488 mm,年均气温5.4 ℃,年均相对湿度为60%,无霜期78 d[12]。区内植被资源丰富,阳坡为山地草原,零星分布有祁连圆柏(*Sabina przewalskii*),海拔2300~3300 m的阴坡以青海云杉林为主,海拔3300 m以上则为亚高山湿性灌木林。土壤类型主要为山地灰钙土、山地栗钙土、森林灰褐土等[18]。植被以青海云杉林和祁连圆柏林为主,灌木主要有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、银露梅(*Potentilla glabra*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)等,草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、针茅(*Stipa capillata*)、黑穗薹草(*Carex atrata*)和马蔺(*Iris lactea*)等[19]。

1.2 样地设置

通过全面踏查,于2021年8月在祁连山大野口流域设置林龄和立地条件基本一致(中龄林80 a)、受人为干扰较小的青海云杉林固定样地27块,9种林分密度(低密度:350株·hm^{-2}、850株·hm^{-2}、1000株·hm^{-2};中密度:1400株·hm^{-2}、1600株·hm^{-2}、1950株·hm^{-2};高密度:2100株·hm^{-2}、2300株·hm^{-2}、3000株·hm^{-2})各设置样地3块,面积为25 m×25 m,样地编号分别记为N_{350}、N_{850}、N_{1000}、N_{1400}、N_{1600}、N_{1950}、N_{2100}、N_{2300}、N_{3000}。记录固定样地的海拔、坡度、坡向、枯落物厚度等生态环境因子,样地基本情况见表1。

1.3 样地调查、生物量测算与样品采集

乔木层调查:(1) 对各样地内胸径≥3 cm的所有树木进行每木检尺,实测胸径、树高等因子,依据每木检尺结果,计算出各样地的平均胸径和平均树高。为保护资源,减少林木损伤,在样地附近选出标准木3~5株,用生长锥钻取树芯结合轮生枝查数确定林龄(平均轮数),采集各器官(干、皮、枝、叶、根)样品500 g送实验室待处理测定分析。(2) 乔木生物量根据王金叶等[20]建立的青海云杉各器官生物量模型,由胸径、树高计算树木各器官生物量,进一步测算整株生物量和单位面积乔木的平均生物量,具体估算方程见表2。

林下植被层调查:在各样地内设置灌木样方(2 m×2 m)、草本样方(1 m×1 m)和枯落物小样方(20 cm×20 cm)各3块,记录每个样方内的灌木和草

表1 不同林分密度青海云杉林林分基本情况

Tab. 1 Basic status of *Picea crassifolia* forest with different stand density

林分密度/株·hm^{-2}	样地数量	海拔/m	平均胸径/cm	平均树高/m	坡向	坡位	坡度/(°)	郁闭度
350	3	2880	15.61±1.32	8.93±1.76	NE	上坡	34	0.35
850	3	2855	20.58±3.53	12.68±0.47	NE	中坡	35	0.66
1000	3	2800	17.33±2.33	10.44±2.42	NE	中下	25	0.60
1400	3	2900	14.10±0.87	9.49±1.19	N	中下	25	0.67
1600	3	2800	14.09±0.39	9.69±0.68	N	中坡	28	0.58
1950	3	2900	15.04±0.28	12.41±1.68	N	中坡	26	0.84
2100	3	2800	11.88±0.52	8.36±0.81	N	下坡	25	0.69
2300	3	2861	12.36±0.66	8.75±0.77	N	中坡	22	0.78
3000	3	2872	10.37±0.59	7.75±1.12	NE	下坡	35	0.69

表2 祁连山青海云杉林各器官生物量相对生长方程

Tab. 2 Relative growth equations of biomass of all the organs of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains

器官	相对生长方程	相关系数(*r*)
干	$W_S=0.0478(D^2H)^{0.8665}$	0.9887
枝	$W_B=0.0122(D^2H)^{0.8905}$	0.9568
叶	$W_L=0.2650(D^2H)^{0.4701}$	0.8622
根	$W_R=3.3756(D^2H)^{0.2725}$	0.9707
皮	$W_P=0.0100D^{2.0983}H^{0.2566}$	0.9168

注：D为胸径；H为树高；W_S为树干生物量；W_B为树枝生物量；W_L为针叶生物量；W_R为根系生物量，W_P为树皮生物量。

本植物种类后，采用“样方收获法”测定生物量。灌木和草本植物按地上和地下，枯落物层按未分解、半分解层（未分解层指基本上保持原有形状和质地的枯枝落叶，半分解层为只有部分植物组织残余尚保持原来形态）分别称重，并取样300 g（若不足300 g，则全部采集）带回实验室，置于85 ℃烘箱烘干至恒重，求出含水率，推算其单位面积干质量。

土壤层调查：在每个样地内沿对角线方向在1/4、中心和3/4位置布设3个采样点，用环刀分层（0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm）取原状土样，每层3次重复，做为土壤容重等物理性质测试样品；每个采样点分层采集土壤样品500 g，混匀、风干、磨细后过筛，密封贮放，做为土壤碳、氮含量测试样品。

1.4 碳、氮含量测定

将野外采集的乔、灌、草各器官及枯落物样品烘干测完生物量后，粉碎过0.149 mm筛封装后待测。土壤样品自然风干，研磨后过2 mm筛（收集大于2 mm的砾石并称重），再用四分法取部分样品研磨过0.149 mm筛封装后待测。植物和土壤碳含量均采用重铬酸钾-硫酸氧化外加热法测定，氮含量采用凯氏法测定[21]，所有指标测定重复3次。

1.5 碳、氮储量计算

不同林分密度植被层、枯落物层碳、氮储量根据其生物量与碳、氮含量估算；土壤层碳、氮储量根据土壤碳、氮含量、容重和土层厚度估算。

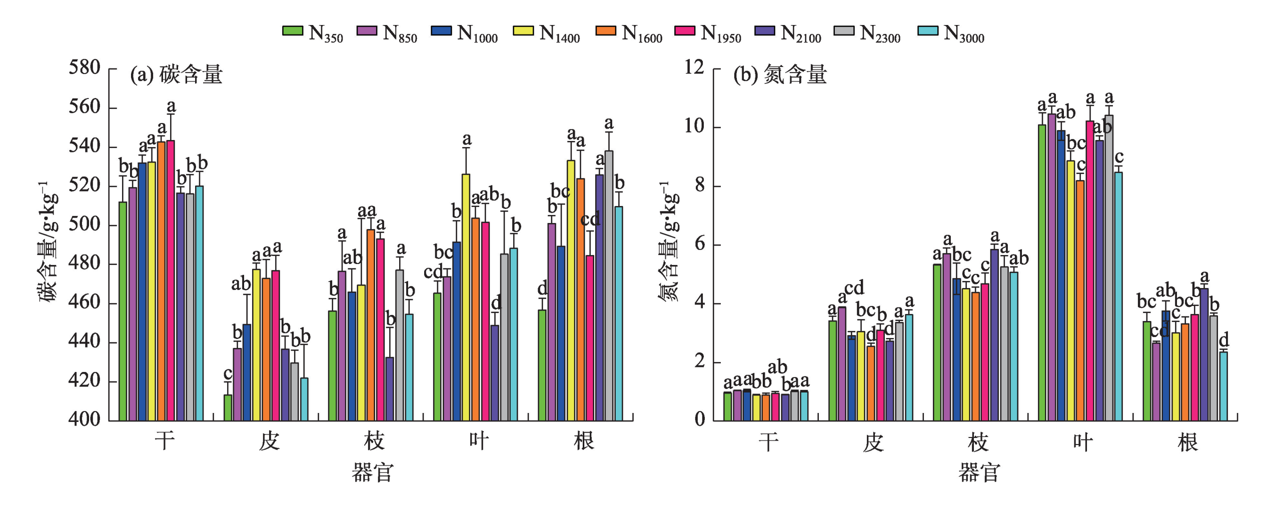
1.6 数据处理与计算

采用Excel 2016和Origin 8.0软件统计各项指标平均值、标准差，并制作图、表；利用SPSS 21.0软件中的方差分析（one Way-ANOVA）的Duncan法比较不同林分密度林分同组分碳、氮储量的差异显著性（$P<0.05$）。图、表中的数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 青海云杉林生态系统各组分碳、氮含量

2.1.1 乔木层碳、氮含量 青海云杉林乔木层碳、氮含量分别为413.37~543.23 g·kg^{-1}和0.96~9.58 g·kg^{-1}（图1）。N_{1600}碳含量均值最高，为508.15 g·kg^{-1}，N_{850}氮含量最高，为4.75 g·kg^{-1}；不同器官碳、氮含量差异显著，树干碳含量最高但氮含量最低，分别为526.02 g·kg^{-1}和0.96 g·kg^{-1}，针叶氮含量最高，为9.58 g·kg^{-1}。



注：不同小写字母表示相同器官不同林分密度间差异显著（$P<0.05$）。下同。

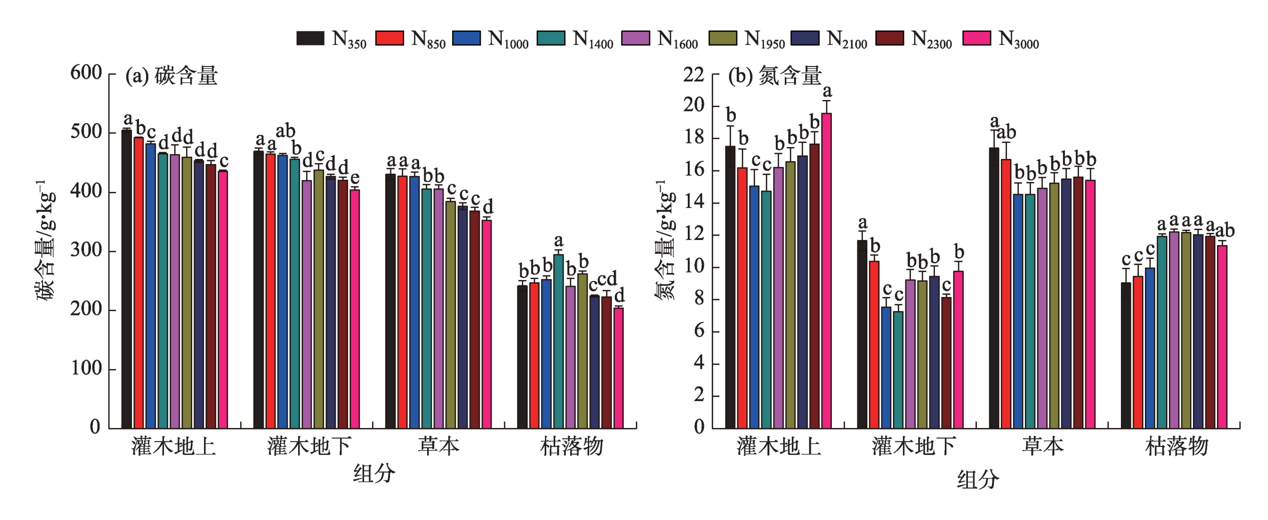
图1 不同林分密度青海云杉林乔木层各器官碳、氮含量

Fig. 1 Carbon and nitrogen content of each organ in arborous layer of *Picea crassifolia* forest with different stand density

2.1.2 林下植被层碳、氮含量 不同林分密度青海云杉林林下植被层碳、氮含量整体呈现为灌木层>草本层>枯落物层，地上部分>地下部分。灌木层碳、氮含量分别为403.88~504.91 g·kg^{-1}和7.27~19.54 g·kg^{-1}，草本层分别为352.54~430.82 g·kg^{-1}和14.54~17.42 g·kg^{-1}，枯落物层分别为203.68~294.71 g·kg^{-1}和9.05~12.20 g·kg^{-1}（图2）。不同林分密度差异显著性检验显示，灌木层、草本层碳含量随着林分密度的增加而显著减小，枯落物碳含量在中密度N_{1400}显著的高于其他林分密度（P<0.05）；灌木地上部分氮含量在N_{3000}、灌木地下部分和草本氮含量在N_{350}均极显著的高于其他林分密度。中、高密度枯落物氮含量显著的高于低密度。

2.1.3 土壤层碳、氮含量 青海云杉林土壤层的碳、氮含量分别为41.11~128.76 g·kg^{-1}和1.70~7.66 g·kg^{-1}（图3），不同林分密度土壤碳、氮含量差异显著（P<0.05），随着林分密度的增大，土壤碳、氮含量均逐渐下降，碳、氮含量以N_{350}最高，其次为N_{850}，以N_{3000}最低。土壤碳、氮含量均随土层加深而逐渐降低，表层（0~10 cm）土壤平均碳、氮含量显著高于其他土层。

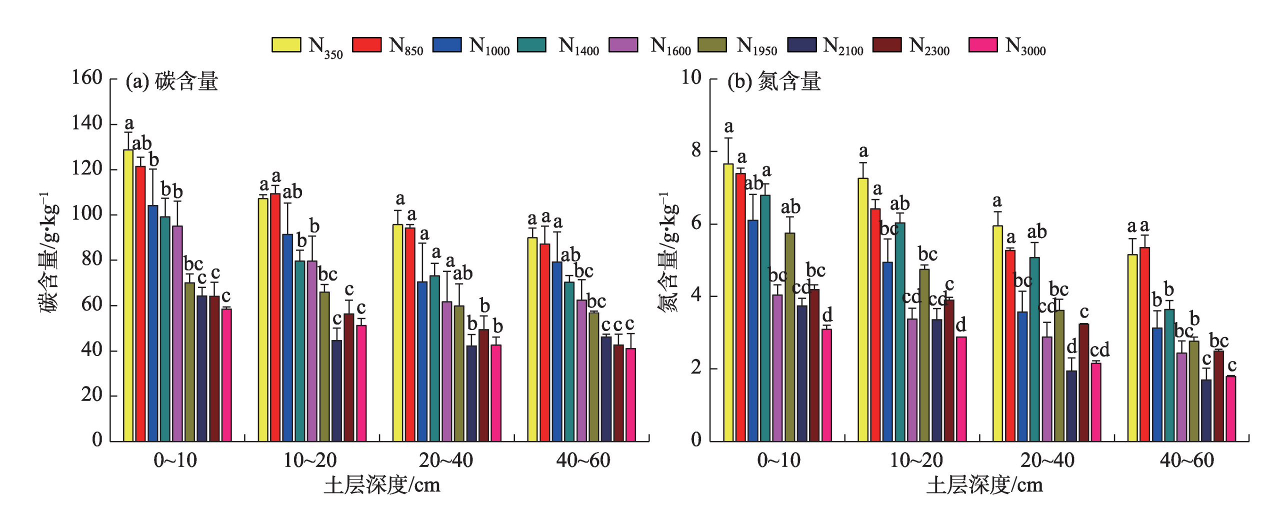
2.1.4 植被和土壤层碳氮比 为了深入了解碳、氮在青海云杉林生态系统的分配格局，计算不同层次碳、氮含量比值，结果显示，乔木层各器官碳氮比依次为干>根>皮>枝>叶。差异显著性检验表明，根和



注：不同小写字母表示相同植被层不同林分密度间差异显著（P<0.05）。

图2 不同林分密度青海云杉林灌木层、草本层和枯落物层碳、氮含量

Fig. 2 Carbon and nitrogen contents in shrub, herb and litter layers of *Picea crassifolia* forest with different stand density



注：不同小写字母表示相同土层不同林分密度间差异显著（P<0.05）。

图3 不同林分密度青海云杉林不同土层土壤碳、氮含量

Fig. 3 Carbon and nitrogen contents in different soil layers of *Picea crassifolia* forest with different stand density

皮之间的碳氮比差异不显著，但均极显著地低于树干，高于枝、叶（$P<0.01$）。林下植被层随木质化程度的降低，碳氮比依次减小，土壤层碳氮比最小，仅为17.96（图4）。

2.2 青海云杉林生态系统碳、氮储量及分配

2.2.1 乔木层及林下植被层碳、氮储量 由图5可以看出，乔木层碳、氮储量随林分密度的增加呈双峰型分布。碳、氮储量均从N_{350}至N_{850}呈现递增趋势，N_{850}达到次峰值（碳、氮储量分别为71.82 t·hm^{-2}和0.44 t·hm^{-2}），N_{1000}开始逐渐降低，N_{1400}降至最低，然后反增至N_{1950}达到主峰值（碳、氮储量分别为107.31 t·hm^{-2}和0.68 t·hm^{-2}），随后开始逐渐下降到N_{3000}（碳、氮储量仅为66.15 t·hm^{-2}和0.46 t·hm^{-2}）。乔木碳、氮储量占整个青海云杉生态系统碳、氮储量的比例也从N_{350}的3.01%和0.37%逐渐增加–降低–增加至N_{1950}出现最高比例23.05%和3.10%。从乔木各器官碳、氮储量分配来看，树干平均碳储量占乔木碳储量的比例最高，达41.66%，是乔木层碳汇的主体，根、枝、叶和皮平均碳储量占比分别为31.51%、11.43%、10.42%和4.98%。根系氮储量占比最高，为32.09%，其次是叶（31.66%）、枝（18.98%）、树干（11.81%），皮的占比最小（5.45%）。

青海云杉林林下植被层碳、氮储量分别占生态系统碳、氮储量的7.80%~13.04%和5.50%~16.73%，总体呈现为枯落物层>灌木层>草本层。灌木和草本层碳、氮储量均在N_{350}显著大于其他密度林分（$P<0.05$）（图6），且密度大于2100株·hm^{-2}时碳、氮储量趋于零。枯落物碳、氮储量随林分密度的增大先升高后降低，在N_{1950}出现碳、氮储量的最高值，达54.81 t·hm^{-2}和2.53 t·hm^{-2}，分别在N_{3000}和N_{350}出现碳和氮储量的最低值，仅为22.80 t·hm^{-2}和1.03 t·hm^{-2}。

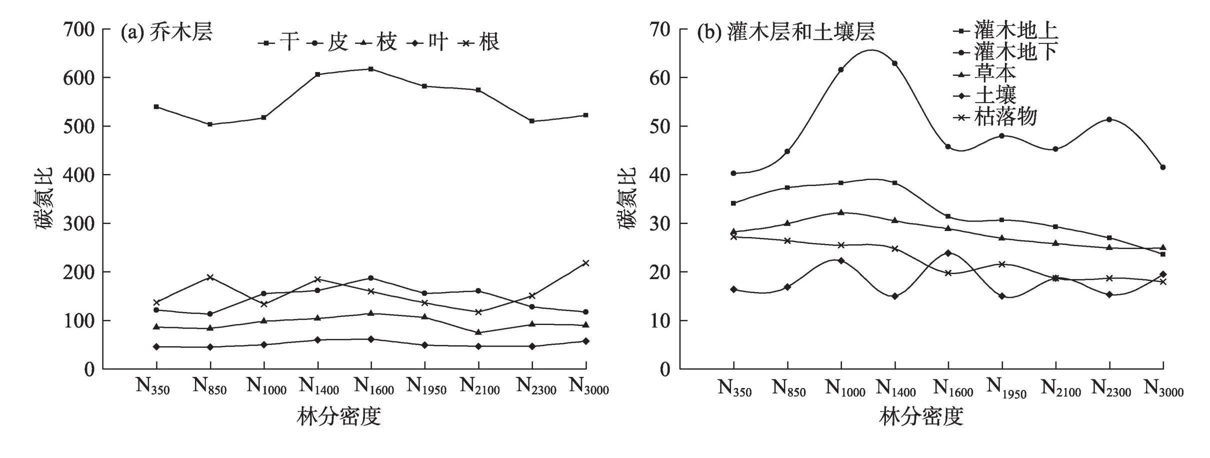


图4　不同林分密度青海云杉林各层次碳氮比

Fig. 4　Carbon-nitrogen ratio of each layers in *Picea crassifolia* forest with different stand density

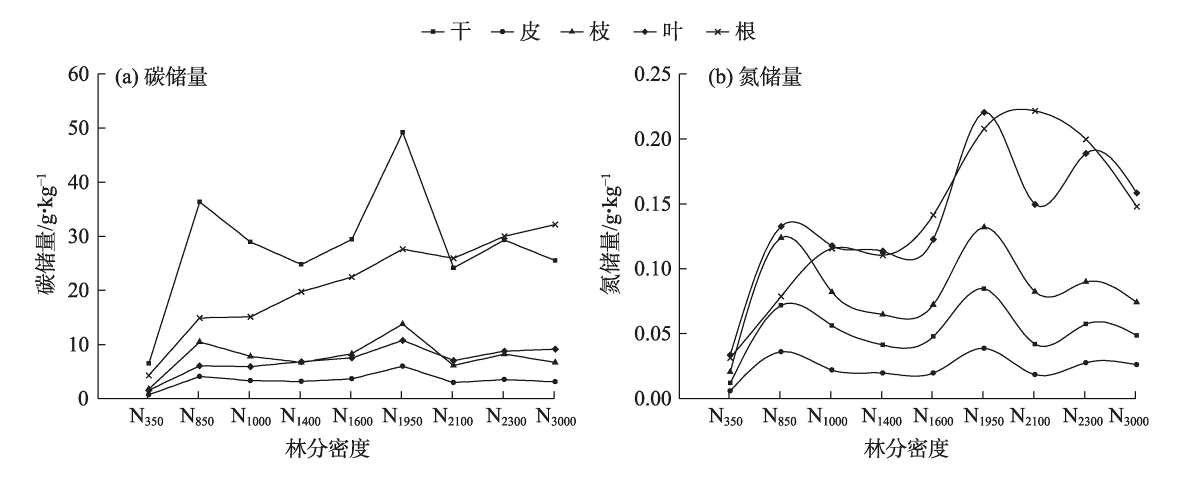


图5　不同林分密度青海云杉林乔木层碳、氮储量及其分配

Fig. 5　Carbon and nitrogen storage and their distribution in arborous layer of *Picea crassifolia* forest with different stand density

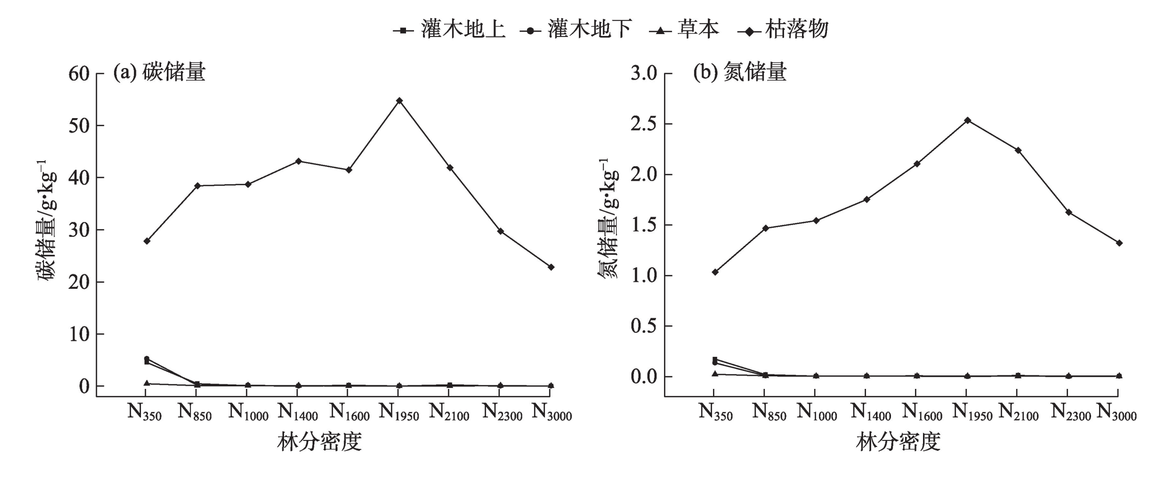


图6 不同林分密度青海云杉林灌木层、草本层和枯落物层的碳、氮储量

Fig. 6 Carbon and nitrogen storage in shrub, herb and litter layers of *Picea crassifolia* forest with different stand density

2.2.2 土壤层碳、氮储量 青海云杉林土壤层碳、氮储量占生态系统碳、氮储量的比例分别为65.18%~89.19%和79.46%~94.08%。随着林分密度增加土壤碳、氮储量呈下降趋势，变化达到显著水平（P<0.05）。N_{350}林分最高，分别为435.65 t·hm^{-2}和23.20 t·hm^{-2}，N_{2300}和N_{2100}林分的土壤碳和氮储量最小，分别为216.04 t·hm^{-2}和10.71 t·hm^{-2}。

土壤碳、氮储量受土壤容重和碳、氮含量的影响，随土层深度增加土壤碳、氮储量逐渐降低（图7）。以0~20 cm土层的碳、氮储量最大，占0~60 cm土层碳、氮储量的比重也最大（分别为31.54%~40.77%和33.96%~46.92%），20~40 cm土层碳储量急剧下降，40~60 cm土层碳储量趋于平缓。

2.2.3 生态系统碳、氮储量及其分配 不同林分密度青海云杉林生态系统碳、氮储量差异显著（P<0.05）。碳储量随林分密度的增加呈双峰型分布，从N_{350}至N_{850}呈现递增趋势，N_{850}达到最高碳储量（500.76 t·hm^{-2}），N_{1000}开始逐渐降低，N_{1600}降至最低谷（422.00 t·hm^{-2}），然后反增至N_{1950}达到第二峰值，随后开始逐渐下降，N_{3000}出现最低碳储量，仅为315.52 t·hm^{-2}。氮储量呈现随林分密度增加先增加后波动降低的趋势，从N_{350}至N_{850}呈现递增趋势，N_{850}氮储量（25.00 t·hm^{-2}）最高，随后逐渐下降，N_{3000}出现最小氮储量，仅为12.52 t·hm^{-2}（表3）。

碳、氮在青海云杉林生态系统的分配差异明显，随林分密度升高，植被碳、氮储量占比逐渐升高，土壤碳、氮储量占比逐渐降低。碳储量分配格局为：土壤层（73.53%）>乔木层（17.03%）>灌草层和枯落物层（9.44%），氮储量分配格局为：土壤层（87.63%）>灌草层和枯落物层（9.90%）>乔木层

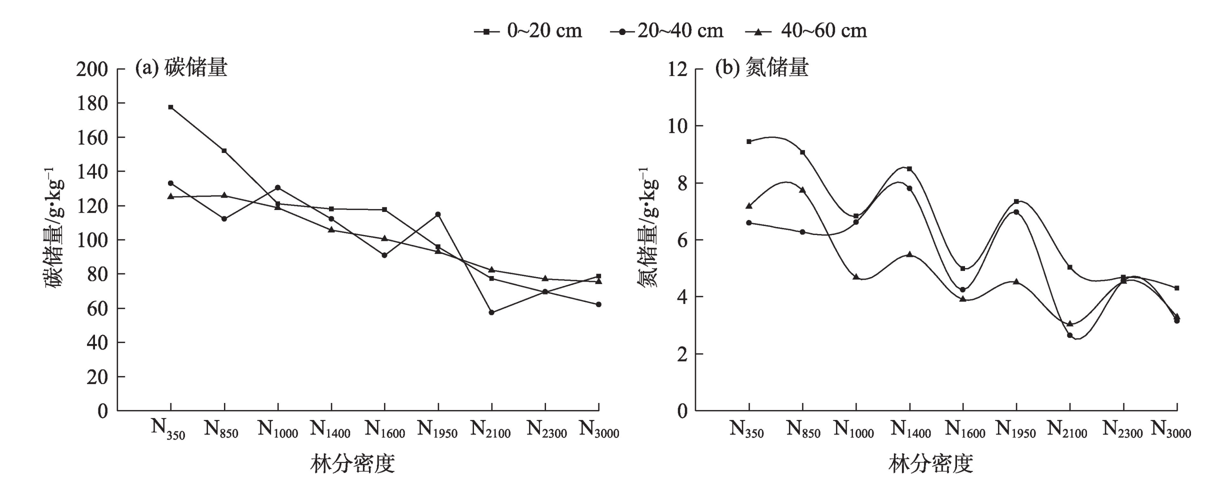


图7 不同林分密度青海云杉林不同土层碳、氮储量

Fig. 7 Carbon and nitrogen storage in different soil layers of *Picea crassifolia* forest with different stand density

表3 青海云杉林生态系统碳、氮储量

Tab. 3 Carbon and nitrogen storage in *Picea crassifolia* forest ecosystem

林分密度/株·hm^{-2}	碳库/t·hm^{-2}			氮库/t·hm^{-2}		
	植被	土壤	生态系统	植被	土壤	生态系统
350	52.80±3.99d	435.65±8.01a	488.44±8.06a	1.46±0.15e	23.20±0.71a	24.66±0.72a
850	111.04±4.03b	389.72±3.78b	500.76±5.37a	1.93±0.11d	23.07±0.07a	25.00±0.12a
1000	100.08±3.68c	370.05±15.66b	470.13±16.03a	1.95±0.11d	18.12±1.01b	20.07±1.03c
1400	104.51±2.37bc	335.93±7.11c	440.43±7.32b	2.11±0.09cd	21.75±0.36a	23.85±0.36a
1600	113.19±2.81b	308.82±27.56c	422.00±26.91b	2.52±0.08bc	13.14±0.51c	15.66±0.49d
1950	162.14±2.69a	303.45±7.18c	465.59±7.68ab	3.22±0.08a	18.82±0.23b	22.03±0.24b
2100	108.58±3.42bc	216.94±3.08d	325.52±5.28c	2.77±0.17b	10.71±0.52d	13.47±0.53e
2300	109.61±5.26bc	216.04±6.98d	325.65±8.65c	2.19±0.28cd	13.79±0.01c	15.98±0.28d
3000	99.47±2.25c	216.05±4.41d	315.52±5.80c	1.78±0.12de	10.74±0.01d	12.52±0.12e

注：不同小写字母表示不同林分密度间差异显著($P<0.05$)。

(2.47%)。土壤碳、氮储量比重在各密度林分均超过65%，在N_{350}甚至超过90%，这说明土壤是生态系统碳、氮储量的主要贡献者。

2.3 青海云杉林各组分碳、氮储量与林分密度相关性

由表4可知，树皮、针叶、树根的碳、氮储量与林分密度均呈极显著正相关，林下灌木、草本、土壤的碳、氮储量以及枯落物碳储量与林分密度均呈极显著负相关，树干碳、氮储量与林分密度显著正相关，树枝碳、氮储量和枯落物氮储量均与林分密度无显著相关关系。

3 讨论

3.1 青海云杉林植被碳、氮含量对林分密度的响应

青海云杉林乔木层平均含碳量为497.11 g·kg^{-1}，低于青海云杉生物量-碳换算系数0.52，高于青藏高原东缘亚高山云冷杉林针叶平均碳含量(442.66 g·kg^{-1})，氮含量与上述区域研究结果一致[22]。林下灌木和草本平均含碳量分别为452.86 g·kg^{-1}和395.87 g·kg^{-1}，以碳转换系数估算林下植被碳储量误差较大，掩盖了不同植被层间的碳含量差异，因而有必要进行碳含量的分层分器官实测。

N_{1600}林分乔木层碳含量最高，N_{350}林下灌木和草本层碳、氮含量最高，而枯落物碳含量在中密度高于其他密度林分，植被层和枯落物层各组分碳、氮含量均与林分密度相关，这与代林利等[8]、那萌等[23]的研究结果基本一致。主要是由于低密度林分中林下植被能够得到更加充足的通风透光条件，温度升高，利于林下植被生长更新和碳、氮的积累，导致林下植被碳、氮含量较高，但低密度枯落物分解速度快，枯落物的生物量和有机碳积累少，使其碳含量较中密度低。林下植被在中高密度林分中占比较小，有研究表明林下植被减少会使枯落物的分解受到抑制，因而合理地保护林下植被能够提高林分的碳吸存潜力[8]。

植物碳氮比反映植物的生长速率和养分利用效率。青海云杉林乔木器官碳、氮含量表现为树干的碳氮比远大于叶器官，这与张雨鉴等[24]的研究结果一致。由于氮素具有较强的流动性，从碳氮比低的叶运输到碳氮比高的枝、干，来促进树木的生长，实现碳积累。

3.2 青海云杉林土壤碳、氮含量对林分密度的响应

土壤碳、氮含量的多少主要取决于枯落物的输入和分解，与森林类型、林分密度、立地条件、植被物覆盖度等因素有关[17]。土壤碳、氮含量均随着林分密度的增加而下降，低于天山雪岭云杉林土壤碳、氮含量(91.35 g·kg^{-1}、7.35 g·kg^{-1})[25]，主要是由于低密度林内通风透光条件较好，气温和地温高，土壤微生物活性增强，枯落物分解速率加快，土壤碳、氮输入增多。同一密度林地的土壤碳含量随土层深度增加呈递减趋势，表层土壤碳、氮含量最高，与辜翔等[26]研究结果一致，深层土壤受植物枯落物、根系的影响程度减弱，因而土壤碳、氮含量的差异随着土层深度的增加有所减弱。

土壤碳氮比通常反映土壤氮素矿化能力，碳氮比低说明土壤有机质矿化速率高[27]。本研究土壤碳氮比高于宁夏贺兰山青海云杉林(17.77)[28]、甘肃

表 4　青海云杉林各组分碳、氮储量与林分密度相关性分析

Tab. 4　Correlation analysis between stand density and carbon, nitrogen storage of *Picea crassifolia* forest

指标	林分密度	干碳	皮碳	枝碳	叶碳	根碳	灌木碳	草本碳	枯落物碳	土壤碳	干氮	皮氮	枝氮	叶氮	根氮	灌木氮	草本氮	枯落物氮	土壤氮
林分密度	1.000																		
干碳	0.138*	1.000																	
皮碳	0.189**	0.987**	1.000																
枝碳	0.103	0.989**	0.976**	1.000															
叶碳	0.729**	0.739**	0.782**	0.718**	1.000														
根碳	0.937**	0.422**	0.473**	0.380**	0.891**	1.000													
灌木碳	–0.394**	–0.409**	–0.432**	–0.396**	–0.546**	–0.500**	1.000												
草本碳	–0.564**	–0.451**	–0.488**	–0.440**	–0.689**	–0.653**	0.637**	1.000											
枯落物碳	–0.180**	0.269**	0.277**	0.289**	0.100	–.090	–0.134*	–0.138*	1.000										
土壤碳	–0.754**	–0.024	–0.065	–0.004	–0.495**	–0.703**	0.299**	0.444**	0.117	1.000									
干氮	0.127*	0.914**	0.910**	0.922**	0.668**	0.369**	–0.412**	–0.431**	0.201**	–0.051	1.000								
皮氮	0.249**	0.913**	0.898**	0.902**	0.704**	0.471**	–0.402**	–0.430**	0.145*	–0.102	0.917**	1.000							
枝氮	0.104	0.888**	0.868**	0.888**	0.598**	0.331**	–0.379**	–0.407**	0.221**	–0.042	0.921**	0.923**	1.000						
叶氮	0.600**	0.777**	0.809**	0.757**	0.884**	0.772**	–0.490**	–0.622**	0.155*	–0.434**	0.761**	0.818**	0.781**	1.000					
根氮	0.636**	0.506**	0.540**	0.478**	0.745**	0.745**	–0.430**	–0.607**	0.178**	–0.556**	0.444**	0.456**	0.522**	0.849**	1.000				
灌木氮	–0.355**	–0.375**	–0.397**	–0.364**	–0.498**	–0.454**	0.983**	0.621**	–0.125	0.260**	–0.378**	–0.368**	–0.347**	–0.446**	–0.391**	1.000			
草本氮	–0.451**	–0.382**	–0.417**	–0.378**	–0.574**	–0.536**	0.624**	0.944**	–0.131*	0.337**	–0.375**	–0.348**	–0.339**	–0.520**	–0.504**	0.644**	1.000		
枯落物氮	0.076	0.298**	0.316**	0.314**	0.278**	0.150*	–0.194**	–0.260**	0.891**	–0.104	0.214**	0.182**	0.254**	0.314**	0.397**	–0.172**	–0.213**	1.000	
土壤氮	–0.700**	0.070	0.048	0.102	–0.373**	–0.611**	0.219**	0.334**	0.216**	0.629**	0.053	0.026	0.065	–0.292**	–0.475**	0.197**	0.266**	–0.002	1.000

注：*、**分别表示在 0.05、0.01 水平（双侧）上显著相关。

亚高山云杉人工林(12.73)[29]和我国土壤碳氮比均值(10~12)[30]。这说明青海云杉林土壤氮素矿化能力较云杉人工林低，微生物也会受到氮素的限值，有机质的分解减缓，从而导致土壤碳储量远高于云杉人工林。

3.3 青海云杉林生态系统碳、氮储量

土壤是青海云杉林生态系统重要的碳、氮存储库。本研究中土壤层(0~60 cm)碳储量高于杉木林生态系统土壤碳储量(88.63~93.17 t·hm^{-2})[8]和我国森林土壤平均碳储量(193.55 t·hm^{-2})[31]。主要是因为青海云杉林地处高寒山区，气温低降水少，土壤微生物活性较弱，抑制了土壤有机碳的分解速率和土壤呼吸[32]，再加上云冷杉林又是我国土壤碳储量最大的森林生态系统[31]。青海云杉林土壤平均氮储量为17.29 t·hm^{-2}，不仅高于川西亚高山主要森林土壤氮储量(岷江冷杉原始林16.44 t·hm^{-2}、天然次生林15.48 t·hm^{-2}、粗枝云杉阔叶林12.11 t·hm^{-2}和粗枝云杉人工林8.92 t·hm^{-2})[33]，也高于中国森林土壤平均氮储量(13.59 t·hm^{-2})[34]。因而本研究区青海云杉林土壤具有较高的碳、氮储量。

青海云杉林植被层平均碳储量为110.44 t·hm^{-2}，氮储量为2.21 t·hm^{-2}，高于全国云冷杉林植被平均碳储量(82.01 t·hm^{-2})[31]、塞罕坝云杉林生物碳贮量(42.92~138.63 t·hm^{-2})[35]和我国森林植被平均氮储量(0.86 t·hm^{-2})[34]。表明祁连山青海云杉林植被层同样具有很强的碳、氮固存潜力。主要是因为祁连山大野口流域青海云杉林以中龄林为主，成、过熟林极少，单位面积植被生物量较高。随着林分密度的增加，植被层碳、氮储量均呈现明显的双峰型变化趋势，密度在1950株·hm^{-2}左右时相对较好，易形成良好的水热空间组合，有利于树木的生长。N_{350}和N_{3000}植被碳、氮储量均较小，与代林利等[8]研究结果相一致，主要是由于低密度林分树木稀疏，郁闭度小，林窗占比大，乔木和林下植被生物量低；高密度林分中光照、水肥的竞争加剧，林分营养空间减少，枯枝增多，活枝和鲜叶减少，生物量碳、氮积累少。

青海云杉林生态系统平均碳储量远高于中国森林平均碳储量258.83 t·hm^{-2}[33]和甘肃云杉人工林平均碳储量362.00 t·hm^{-2}[29]；氮储量也高于岷江冷杉原始林氮储量(16.44 t·hm^{-2})、粗枝云杉人工林(8.92 t·hm^{-2})[33]和马尾松、杉木人工林氮储量(15.15 t·hm^{-2}、16.70 t·hm^{-2})[36]。这表明青海云杉林碳、氮固存能力非常强。从碳、氮储量的分配格局来看，土壤碳、氮储量在生态系统处于主导地位(各密度碳、氮储量占比均超过65%和75%)，这与岳军伟等[29]、刘顺等[33]、杨支齐等[36]、曾立雄等[17]研究结果一致。碳氮储量的分配及相关性分析表明碳、氮储量之间存在极显著正相关关系，植被和土壤的氮素在一定程度上能够促进森林碳汇功能。然而，林分密度能够改变碳、氮储量在植物和土壤间的分配情况，林分密度由N_{350}增加到N_{1950}的过程中，生态系统碳、氮由土壤向植被转运，N_{1950}植被碳氮固持能力达到最强，随着密度再度增加，植被和土壤碳氮损失增加，碳氮储量逐渐降低，最终N_{850}林分碳、氮储量达到最高，N_{3000}出现最低值，这与何潇等[37]关于长白落叶松碳储量密度效应的研究结果相似。当然，由于林分类型、林龄、密度范围的不同，依据生态系统碳、氮储量选择的最优林分密度也不尽相同[8,23]。

综上分析，祁连山大野口流域低密度850株·hm^{-2}青海云杉林具有较高的碳、氮固存潜力，对于碳、氮贮存能力较弱的高密度林分，应采取科学的经营措施，改善林分密度和林内环境，促进生物量及碳、氮储量的增长。并且加强对森林土壤和凋落物等潜在碳源的保护，更好地发挥次生林固碳释氧和积累营养物质的生态功能，促进青海云杉林生态系统的稳定性和可持续发展。

青海云杉林生长缓慢、培育周期长。随着林龄的增长，林分碳、氮储量也随之变化。因而，对其碳、氮库的研究是一项长期而复杂的任务。本研究仅调查分析了中龄林植被和土壤碳、氮储量及分配格局对林分密度的响应特征，未涉及碳、氮储量与气候、微生物和土壤理化性质的相互作用，有待继续深入研究。并且随着试验区林分的生长发育，今后生物量、碳、氮含量的变化趋势也需继续跟踪监测。

4 结 论

对9种密度青海云杉林碳、氮储量及其分配格局进行研究，主要结论如下：

(1) 林分密度对青海云杉林乔木层碳、氮含量影响显著，随密度增加先升高后波动降低。

(2) 各器官碳含量分配表现为干>根>叶>枝>

皮，氮含量表现为叶>枝>根>皮>干；林下植被层碳、氮含量总体表现为灌木层>草本层>枯落物层。

（3）土壤碳、氮含量随着林分密度的增加逐渐下降，并随土层加深逐渐降低。

（4）青海云杉林碳储量随林分密度的增加呈双峰型分布，氮储量呈现随林分密度增加先增加后波动降低的趋势，N_{850}林分碳、氮储量最高，N_{3000}最低；随林分密度增加，植被碳、氮储量占比逐渐升高，土壤占比逐渐降低。碳储量空间分配格局为：土壤层>乔木层>灌草层和枯落物层，氮储量分配格局为：土壤层>灌草层和枯落物层>乔木层。

（5）N_{850}林分植被和土壤碳、氮固持能力最强，能更好地适应祁连山区的地理环境，发挥青海云杉林的生态效益，是祁连山青海云杉中龄林的最佳留存密度。

参考文献（References）

[1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[2] 陈东升, 孙晓梅, 张守攻. 不同年龄日本落叶松人工林生物量、碳储量及养分特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3759-3768. [Chen Dongsheng, Sun Xiaomei, Zhang Shougong. Biomass, carbon storage and nutrient characteristics in *Larix kaempferi* plantations at different stand ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3759-3768.]

[3] Lu X T, Yin J X, Jepsen M R, et al. Ecosystem carbon storage and partitioning in a tropical seasonal forest in southwestern China[J]. Forest Ecology and Management. 2010, 260: 1798-1803.

[4] 李威, 黄玫, 张远东, 等. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 799-809. [Li Wei, Huang Mei, Zhang Yuandong, et al. Spatial-temporal variations of carbon storage and carbon sequestration rate in China's national forest parks[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 799-809.]

[5] Fowler Z K, Adams M B, Peterjohn W T. Will more nitrogen enhance carbon storage in young forest stands in central Appalachia [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 337: 144-152.

[6] Eldegard K, Scholten J, Stokland J N, et al. The influence of stand density on bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) cover depends on stand age, solar irradiation, and tree species composition[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 432: 582-590.

[7] 卢立华, 农友, 李华, 等. 保留密度对杉木人工林生长和生物量及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 717-724. [Lu Lihua, Nong You, Li Hua, et al. Effects of retention density on growth, biomass, and economic benefit of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 717-724.]

[8] 代林利, 周丽丽, 伍丽华, 等. 不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 710-719. [Dai Linli, Zhou Lili, Wu Lihua, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 710-719.]

[9] Noh N J, Kim C, Bae S W, et al. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities[J]. Journal of Plant Ecology, 2013, 6(5): 368-379.

[10] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, et al. Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 466: 118-127.

[11] 王金叶, 王艺林, 金博文, 等. 干旱半干旱区山地森林的水分调节功能[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 120-125. [Wang Jinye, Wang Yilin, Jin Bowen, et al. Studies on regulation of forest hydrology and microclimate in arid and semi-arid area of west China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(5): 120-125.]

[12] 拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6871-6882. [Ta Feng, Liu Xiande, Huang Dongliu, et al. Quantitative dynamica of *Picea crassifolia* population in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6871-6882.]

[13] 刘思敏, 马剑, 牛赟, 等. 祁连山青海云杉林分结构及其与环境因子的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(7): 107-114. [Liu Simin, Ma Jian, Niu Yun, et al. Stand structure and its relationship with environmental factors of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(7): 107-114.]

[14] 杜苗苗, 张芬, 勾晓华, 等. 祁连山中东部青海云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 14-23. [Du Miaomiao, Zhang Fen, Gou Xiaohua, et al. Different responses of radial growth of *Picea crassifolia* to climate warming in the middle and eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 14-23.]

[15] 高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 等. 祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 219-227. [Gao Haining, Li Caixia, Sun Xiaomei, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 219-227.]

[16] 拓锋, 刘贤德, 刘润红, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群空间格局及其关联性[J]. 植物生态学报, 2020, 44(11): 1172-1183. [Ta Feng, Liu Xiande, Liu Runhong, et al. Spatial distribution patterns and association of *Picea crassifolia* population in Dayekou Basin of Qilian Mountains, northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(11): 1172-1183.]

[17] 曾立雄, 雷蕾, 王晓荣, 等. 海拔梯度对祁连山青海云杉林乔木层和土壤层碳密度的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7168-7177. [Zeng Lixiong, Lei Lei, Wang Xiaorong, et al. Effect of alti-

tudinal variation on carbon density in arbor layer and soil layer of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7168-7177.]

[18] Qi C L, Jiao L, Xue R H, et al. Time scale effects of radial growth responses of two dominant coniferous trees on climate change in the eastern Qilian Mountains[J]. Forests, 2022, 13(1): 72-72.

[19] Wan Y Y, Yu P T, Li X Q, et al. Divergent seasonal patterns of Qinghai spruce growth with elevation in northwestern China[J]. Forests, 2022, 13(3): 388-388.

[20] 王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9-14. [Wang Jinye, Che Kejun, Jiang Zhirong. Study on carbon balance of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(1): 9-14.]

[21] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 31-33. [Liu Guangsong. Soil physicochemical analysis and profile description[M]. Beijing: China Standard Press, 1996: 31-33.]

[22] 齐瑞, 刘锦乾, 李波, 等. 青藏高原东缘亚高山针叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2020, 40(12): 2140-2147. [Qi Rui, Liu Jinqian, Li Bo, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of subalpine coniferous forests on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(12): 2140-2147.]

[23] 那萌, 刘婷岩, 张彦东, 等. 林分密度对水曲柳人工林碳储量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 20-26. [Na Meng, Liu Tingyan, Zhang Yandong, et al. Effects of stock density on carbon storage in *Fraxinus mandshurica* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1): 20-26.]

[24] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤. 滇中亚高山森林乔木层各器官生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1669-1678. [Zhang Yujian, Song Yali, Wang Keqin. Ecological stoichiometry of various organs in the tree layer of subalpine forests in central Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1669-1678.]

[25] 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 等. 不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2715-2723. [Ma Xinyu, Gong Lu, Zhu Haiqiang, et al. Effects of different carbon inputs on soil stoichiometry in Tianshan Mountains[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2715-2723.]

[26] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 595-608. [Gu Xiang, Zhang Shiji, Liu Zhaodan, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon concentration and density in the mid-subtropical region of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(5): 595-608.]

[27] 郭鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1899-1907. [Guo Xiaoxia, Wei Tianxing, Chen Yuxuan, et al. The characteristics of soil ecological stoichiometry in typical fallow restored vegetations in the loess hilly areas[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1899-1907.]

[28] 刘丽贞, 陈林, 庞丹波, 等. 基于稳定碳同位素分析宁夏典型林分土壤有机碳分布格局及影响因素[J]. 西北植物学报, 2021, 41(5): 846-853. [Liu Lizhen, Chen Lin, Pang Danbo, et al. Soil organic carbon distribution patterns and influencing factors in Ningxia typical stand based on stable carbon isotope analysis[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(5): 846-853.]

[29] 岳军伟, 关晋宏, 邓磊, 等. 甘肃亚高山云杉人工林生态系统碳、氮储量动态和分配格局[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7790-7800. [Yue Junwei, Guan Jinhong, Deng Lei, et al. Dynamics and allocation patterns of carbon and nitrogen storage in *Picea asperata* plantations in subalpine areas of Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7790-7800.]

[30] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.

[31] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522. [Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(5): 518-522.]

[32] Zheng X L, Zhao C Y, Peng S Z, et al. Soil CO_2 efflux along an elevation gradient in Qinghai spruce forests in the upper reaches of the Heihe River, northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(5): 2065-2076.

[33] 刘顺, 罗达, 刘千里, 等. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1074-1083. [Liu Shun, Luo Da, Liu Qianli, et al. Carbon and nitrogen storage and distribution in different forest ecosystems in the subalpine of western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1074-1083.]

[34] 徐丽, 何念鹏. 中国森林生态系统氮储量分配特征及其影响因素[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(10): 1374-1385. [Xu Li, He Nianpeng. Nitrogen storage and allocation in China's forest ecosystems[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 50(10): 1374-1385.]

[35] 王志杰, 房子怡, 张菲, 等. 塞罕坝地区典型人工林生物碳贮量的比较[J]. 林业与生态科学, 2022, 37(2): 174-179. [Wang Zhijie, Fang Ziyi, Zhang Fei, et al. Comparison of biocarbon storage of typical plantation in Saihanba area[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2022, 37(2): 174-179.]

[36] 杨支齐, 杜虎, 曾馥平, 等. 广西主要人工林生态系统氮储量格局[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5446-5457. [Yang Zhiqi, Du Hu, Zeng Fuping, et al. Nitrogen storage patterns of main plantation ecosystems in Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5446-5457.]

[37] 何潇, 周超凡, 雷相东, 等. 长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1-10. [He Xiao, Zhou Chaofan, Lei Xiangdong, et al. Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(11): 1-10.]

Carbon and nitrogen storage and allocation patterns of *Picea crassifolia* forest with different stand density

FENG Yiming[1], LYU Chunyan[1], WANG Ling[2], ZHAO Weijun[3], MA Xue'e[3], DU Junlin[1], HE Junling[1]

(1. Hexi University, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve Management Center, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: This study investigated the carbon and nitrogen sequestration capacity and the recycling and influence mechanisms of the *Picea crassifolia* forest ecosystem in the Qilian Mountains, northwest China. The stand densities of 350 plants·hm^{-2}, 850 plants·hm^{-2}, 1000 plants·hm^{-2}, 1400 plants·hm^{-2}, 1600 plants·hm^{-2}, 1950 plants·hm^{-2}, 2100 plants·hm^{-2}, 2300 plants·hm^{-2}, and 3000 plants·hm^{-2} of *P. crassifolia* forest were considered for field investigation, sample collection and analysis, carbon and nitrogen storage, and allocation patterns of the *P. crassifolia* forest ecosystem. The results revealed that: (1) The mean carbon content value of the arbor layer in the *P. crassifolia* forest was 497.11 g·kg^{-1}, and the nitrogen content was 4.43 g·kg^{-1}. The allocation patterns of the carbon content in each organ followed the order of stem>root>leaf>branch>bark, and the distribution pattern of nitrogen content was leaf>branch>root>bark>trunk. The carbon and nitrogen content of the understorey vegetation layer generally exhibited a sequence of shrub layer>herb layer>litter layer, and the aboveground part>underground part. The content of carbon and nitrogen in the soil layer decreased with the increase in the stand density and decreased with the increase in the soil depth. (2) The carbon storage of the *P. crassifolia* forest ecosystem revealed a two-peak pattern distribution with the increase in the stand density. Nitrogen storage first increased and subsequently fluctuated with the increase in the stand density. When the density was 850 plants·hm^{-2}, carbon and nitrogen storage were the highest (500.76 t·hm^{-2} and 25.00 t·hm^{-2}, respectively), and when the density was 3000 plants·hm^{-2}, the carbon and nitrogen storage were the lowest (315.52 t·hm^{-2} and 12.52 t·hm^{-2}, respectively). With the increase in the stand density, the proportion of vegetation carbon and nitrogen storage gradually increased, and the proportion of soil carbon and nitrogen storage gradually decreased. The allocation patterns of carbon storage followed the order of the soil layer (73.53%)>tree layer (17.03%)>understory layer (9.44%), and nitrogen storage followed the soil layer (87.63%)>understory layer (9.90%)>tree layer (2.47%). (3) The results revealed that the stand density is closely related to forest carbon and nitrogen storage and allocation patterns. Low density (850 plants·hm^{-2}) can improve carbon and nitrogen sequestration capacities of vegetation and soil, which is the best retention density of middle-aged *P. crassifolia* forest in the Qilian Mountains. The results provide a scientific basis for explaining the influence of the stand density on the carbon and nitrogen sequestration capacity of forest ecosystems and the structural management of forests.

Key words: stand density; *Picea crassifolia* forest; carbon and nitrogen storage; Qilian Mountains